

ENERGÍA CINÉTICA DE LAS GOTAS EMITIDAS POR UN ASPERSOR

*Bautista Capetillo, C. F.¹, Playán, E.², Salvador, R.², Montero, J.³, Burguete, J.²,
Tarjuelo, J. M.³, Zapata, N.² y González, T. J.¹*

RESUMEN

La energía cinética de las gotas que emite un aspersor puede llegar a modificar las características del suelo, repercutiendo negativamente en los procesos de escurrimiento, erosión e infiltración. En este trabajo se presenta el cálculo de la energía cinética para un aspersor ensayado en el Laboratorio de Ensayos de Material de Riego que posee la Conserjería de Agricultura de la JCCM y la Universidad de Castilla-La Mancha en Albacete, aplicando las técnicas fotográfica y disdrométrica. Los resultados obtenidos por las dos técnicas fueron comparados con los valores que predice la teoría balística, estableciéndose relaciones entre el diámetro de las gotas y la energía cinética contenida en ellas, evaluadas en 12 escenarios diferentes (3 presiones y 4 distancias al aspersor). Se propusieron expresiones para el cálculo de la energía cinética en función del diámetro de la gota, para las distintas presiones de trabajo.

1.- INTRODUCCIÓN

Un sistema de riego por aspersión distribuye agua en forma de pequeñas gotas discretas viajando a través del aire. La evaluación de las características cinéticas de estas gotas es particularmente importante en el riego por aspersión. Esto es debido a que la energía de impacto del agua sobre la superficie del suelo esta ligada a la presencia de escurrimiento y erosión, además de modificar los procesos de infiltración (Tarjuelo, 1995; Kincaid et al., 1996). Kincaid (1996) presenta un resumen de diversas investigaciones en las que se muestran algunas relaciones entre la energía cinética contenida en las gotas de agua y los efectos erosivos y de infiltración para diferentes suelos.

Además de la importancia sobre la posible erosión de los suelos, la distribución de los tamaños de gotas explica otros principios relacionados con la distribución del agua en riego por aspersión, destacando las mayores pérdidas por evaporación y arrastre cuando las gotas son muy pequeñas (menores de 1,5 mm de diámetro) (Edling, 1985; Kincaid y Longley, 1989) o la mayor heterogeneidad de riego cuando se forman gotas muy pequeñas (Montero et al., 2003).

El tamaño de las gotas emitidas por un aspersor, la velocidad con la cual se mueven y la distancia que alcanzan desde que salen por la boquilla hasta llegar a la superficie del suelo, dependen de diversos factores. Entre ellos se incluye el tipo de aspersor y boquilla utilizados, las condiciones hidráulicas de trabajo y las características medioambientales de la región. La interacción de estos factores complica sustancialmente la valoración de las características geométricas y cinemáticas de las gotas para un sistema de riego por aspersión. De tal manera que el diseño y las reglas de operación para estos sistemas, son específicas para un sitio en particular (Playán et al., 2006).

¹Universidad Autónoma de Zacatecas, Av. Ramón López Velarde 801, Col. Centro, 98000 Zacatecas, Zacatecas, México. baucap@uaz.edu.mx

² Estación Experimental de Aula Dei, CSIC. Apdo. 202, 50080 Zaragoza, España.

³ Universidad Castilla-La Mancha, Campus Universitario s/n, 02071 Albacete, España.

La teoría balística constituye la herramienta más comúnmente utilizada en la simulación de la trayectoria que siguen las gotas de agua emitidas por un aspersor; sin embargo, hasta el momento no ha sido posible establecer una generalización de los modelos balísticos debido principalmente a que la calibración del modelo requiere en cada caso establecer las condiciones específicas con las cuales opera el sistema. Estas condiciones incluyen: diámetro y forma de la boquilla, presión de trabajo, elevación de la boquilla respecto a la superficie del suelo y velocidad del viento (Montero et. al, 2001).

En este trabajo se presenta el cálculo de la energía cinética para un conjunto de gotas emitidas por un aspersor en condiciones de laboratorio (en ausencia del viento). El tamaño y la velocidad de las gotas fueron medidos aplicando las técnicas fotográfica y disdrométrica. Los valores experimentales calculados fueron comparados con las predicciones del modelo balístico para 12 combinaciones de presión y distancia (3 presiones y 4 distancias). Finalmente, se presentan ecuaciones para determinar la energía cinética en función del diámetro de las gotas que emite el aspersor, a las diferentes condiciones de presión consideradas.

2.- MATERIALES Y MÉTODOS

2.1.- Localización y características del experimento

El experimento de caracterización de gotas fue realizado en el Laboratorio de Ensayos de Material de Riego que posee la Conserjería de Agricultura de la JCCM y la Universidad de Castilla-La Mancha, en Albacete, España (Figura 1). El aspersor utilizado fue del modelo VYR35 (VYRSA, Burgos), con una boquilla principal de 4,8 mm de diámetro y 26° de inclinación con respecto a la horizontal (VYRSA, 2007). Las presiones de trabajo evaluadas fueron 200, 300 y 400 kPa y las características de las gotas fueron medidas a 3, 6, 9 y 12 m desde el aspersor. La elevación de la boquilla fue de 0,50 m con respecto a la superficie de medición (elevación cero).

2.2.- Medición de la distribución del tamaño y la velocidad de las gotas

La distribución del tamaño y de la velocidad de movimiento de las gotas para las diferentes combinaciones de presión y distancia fue medida empleando las técnicas fotográfica y disdrométrica. En la primera técnica se empleó una cámara fotográfica réflex digital (Nikon, modelo D80) configurada para tomar fotografías de manera automática (en ráfaga) a una velocidad de obturación igual a 100 (0.01 s) y con una apertura del diafragma (F) de 5; en la segunda técnica fue utilizado un disdrómetro óptico modelo ODM 470 fabricado por Eigenbrodt (Königsmoor, Alemania) (Montero et al., 2003).

La técnica fotográfica permite capturar gotas de forma secuencial para posteriormente a través de un tratamiento digital poder visualizar las impresiones en un ordenador y así evaluar el diámetro de la gota, la velocidad de movimiento y el ángulo con el cual llegan a la superficie de medición (Salvador et al., 2008). En la Figura 2, se presentan algunas de las gotas capturadas en el Laboratorio de Riego por Aspersión y que son utilizadas en este trabajo.



Figura 1. Panorámica del Laboratorio de Riego por Aspersión durante la realización de los experimentos.

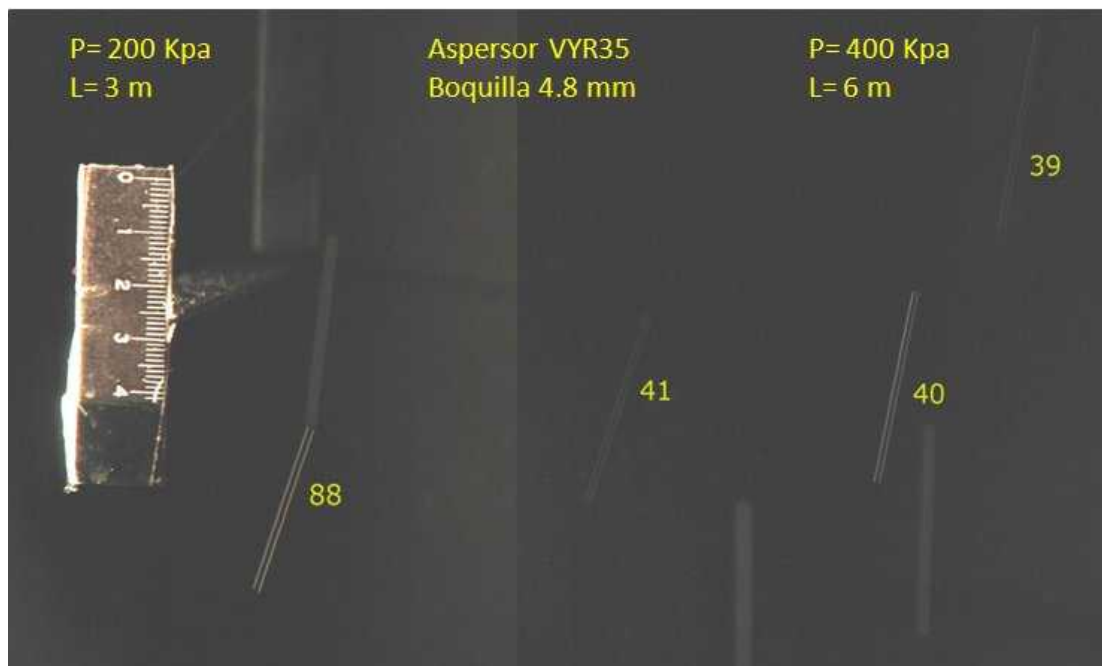


Figura 2. Gotas capturadas con técnica fotográfica a distintas presiones y distancias.

Para determinar el tamaño y la velocidad de las gotas, el disdrómetro óptico basa su funcionamiento en la atenuación del flujo luminoso de un haz de rayos infrarrojos cuando las

gotas de agua pasan a través de una ventana óptica. El funcionamiento preciso y las condiciones para medir las características de las gotas se pueden consultar en Montero et al. (2006).

2.3.- Descripción del modelo balístico

En las últimas décadas se han desarrollado diferentes modelos para simular el riego por aspersión considerando el efecto del viento como su principal agente de distorsión y por lo tanto un factor determinante en la uniformidad del riego (Fukui et al., 1980; Vories et al., 1987; Carrión et al., 2001). En estos modelos, un aspersor es considerado como un aparato emitiendo gotas de diferentes diámetros. La trayectoria de las gotas (desde su salida del aspersor y hasta alcanzar la superficie del suelo) se determina aplicando la teoría balística. Según ésta el movimiento de las gotas de agua está influenciado por su vector velocidad inicial, la fuerza gravitacional actuando en la dirección vertical, el vector viento y la fuerza de resistencia aerodinámica, que se aplica en la dirección opuesta al movimiento relativo de la gota en el aire (Vories et al., 1987; Carrión et al., 2001; Dechmi, 2002).

Debido a la complejidad para analizar el proceso del chorro que sale del aspersor, las siguientes simplificaciones se han considerado en los modelos balísticos. Primera, el chorro se disgrega a la salida de la boquilla en gotas individuales y de diferentes diámetros, las cuales se mueven independientemente en el aire; segunda, el coeficiente de resistencia aerodinámica es independiente de: la altura del aspersor respecto a la superficie del suelo, el ángulo de inclinación con el cual sale el chorro, la velocidad del viento y el diámetro de la boquilla y; tercera, las gotas de diferentes diámetros caen a diferentes distancias (Carrión et al., 2001).

Fukui et al. (1980) presentan las ecuaciones fundamentales que describen la trayectoria del chorro a partir del modelo balístico; de acuerdo con este trabajo, el movimiento de las gotas en un sistema tridimensional cartesiano está dado por:

$$A_x = \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = - \frac{3}{4} \frac{\rho_a}{\rho_w} \frac{C_d}{d} V(W_x - U_x) \quad [1]$$

$$A_y = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = - \frac{3}{4} \frac{\rho_a}{\rho_w} \frac{C_d}{d} V(W_y - U_y) \quad [2]$$

$$A_z = \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = - \frac{3}{4} \frac{\rho_a}{\rho_w} \frac{C_d}{d} V W_z - g \quad [3]$$

Donde x, y, z son las coordenadas de las gotas viajando a través de aire con respecto a la superficie del suelo y teniendo como origen la boquilla del aspersor, t es el tiempo que tardan las gotas en desplazarse desde la boquilla hasta alcanzar el suelo, ρ_a es la densidad del aire, ρ_w es la densidad del agua, A es la aceleración de la gota en el aire, d es el diámetro de la gota, g es la aceleración de la gravedad, C_d es el coeficiente de resistencia aerodinámica, el cual puede expresarse como una función del número de Reynolds; o bien, como una función de la presión de trabajo, el diámetro de la gota, el diámetro equivalente y el coeficiente de descarga de la boquilla (Li and Kawano, 1995). W es el vector velocidad de la gota con respecto al suelo, que es igual a la suma de la velocidad de la gota en el aire (V) y el vector viento (U), el cual se considera paralelo a la superficie del suelo. La ecuación propuesta por Li y Kawano (1995) para determinar el coeficiente de resistencia aerodinámica es:

$$C_d = 51.46P^{-0.179}d^{-1.181}D_e^{-1.936}C^{-3.318} \text{ para } d \leq 2 \text{ mm} \quad [4]$$

$$C_d = 0.3 \text{ para } d > 2 \text{ mm}$$

Donde P es la presión de trabajo en kPa, d es el diámetro de la gota en mm, D_e es el diámetro equivalente en mm y se calcula como $D_e = \frac{4A}{P}$, siendo A el área hidráulica a la salida de la boquilla, P es el perímetro mojado a la salida de la boquilla y C es el coeficiente de descarga de la boquilla, adimensional.

Para resolver el modelo balístico mostrado en las ecuaciones 1-3, generalmente suele utilizarse la simulación numérica de Runge-Kutta de cuarto orden (Press et al., 1988). Esta técnica numérica permite determinar la posición de las gotas en intervalos discretos de tiempo ($\Delta t=0,005$ s). Conocida la distancia que han alcanzado las gotas, según su diámetro, desde que salen de la boquilla del aspersor y hasta que alcanzan la superficie del suelo, es posible también predecir la velocidad con la cual han impactado en el suelo; de tal manera que es posible estimar la energía cinética de las gotas en función de la siguiente expresión:

$$E_c = \frac{1}{8} \pi d^3 \rho V_0^2 \quad [5]$$

Donde E_c es la energía cinética de la gota de agua en Julios, d es el diámetro de la gota en m, ρ es la densidad absoluta del agua en kg/m³ y V₀ es la velocidad de la gota a la elevación cero en m/s.

En el cálculo de la energía cinética fueron utilizadas 1.200 gotas caracterizadas por el método fotográfico y 13.000 gotas caracterizadas con la técnica del disdrómetro. Ambas técnicas permitieron determinar el diámetro y la velocidad para cada gota. Se obtuvo la energía cinética total por cada litro de agua descargada, considerando la distribución de las gotas para cada distancia y cada presión analizada en este trabajo; además, fue calculada la energía cinética media por cada litro de agua descargada por el aspersor (Khol et al., 1985; Kincaid, 1996; DeBoer y Monnens, 2001).

2.4 Parámetros de centralidad y dispersión

Un análisis estadístico fue realizado para determinar los parámetros de centralidad y dispersión a las gotas capturadas con las fotografías y el disdrómetro. Los parámetros calculados fueron la media aritmética, la media volumétrica y la desviación estándar para el diámetro; para la velocidad se determinaron la media aritmética y la desviación estándar. Las ecuaciones para el cálculo de los valores antes mencionados se muestran a continuación:

Media aritmética

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad [6]$$

Media volumétrica

$$\phi_V = \frac{\sum_{i=1}^n d_i^4}{\sum_{i=1}^n d_i^3} \quad [7]$$

Desviación estándar

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad [8]$$

3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se muestran la media y la desviación estándar de las variables mencionadas, considerando para su determinación las ecuaciones 6, 7 y 8 según el valor calculado. En la Figura 3 se presenta la relación entre el diámetro y la energía cinética en las 12 condiciones analizadas (3 presiones por 4 distancias) para las gotas capturadas con la técnica fotográfica. En la Figura 3 se observa que entre 3 y 6 metros la energía cinética es muy similar para las tres presiones. Sin embargo, a los 9 y 12 metros la energía cinética es mayor a la presión de 200 kPa que a las presiones de 300 y 400 kPa. Estas diferencias son debidas al mayor diámetro de las gotas y también a una mayor velocidad. Ambas variables están directamente relacionadas con la energía cinética (con distintos exponentes).

Tabla 1. Parámetros de centralidad y dispersión para los métodos fotográfico y disdrométrico.

Distancia desde el aspersor (m)	FOTOGRAFÍAS					DISDRÓMETRO				
	200 kPa					200 kPa				
	Diámetro (mm)			Velocidad (m/s)		Diámetro (mm)			Velocidad (m/s)	
	ϕ_A	ϕ_V	S_D	V_A	S_V	ϕ_A	ϕ_V	S_D	V_A	S_V
3	0,86	1,12	0,26	2,72	0,34	0,89	1,02	0,17	5,67	4,12
6	1,04	1,48	0,37	3,06	0,64	0,98	1,96	0,44	6,22	4,72
9	1,50	1,93	0,49	4,19	0,75	1,19	2,29	0,53	5,38	5,20
12	3,08	3,28	0,88	6,01	1,04	1,05	3,36	0,71	6,45	3,83

Distancia desde el aspersor (m)	300 kPa					300 kPa				
	Diámetro (mm)			Velocidad (m/s)		Diámetro (mm)			Velocidad (m/s)	
	ϕ_A	ϕ_V	S_D	V_A	S_V	ϕ_A	ϕ_V	S_D	V_A	S_V
	ϕ_A	ϕ_V	S_D	V_A	S_V	ϕ_A	ϕ_V	S_D	V_A	S_V
3	0,81	1,08	0,26	2,45	0,19	0,84	0,94	0,14	6,65	4,73
6	1,03	1,43	0,38	2,92	0,61	0,87	1,32	0,26	6,35	5,56
9	1,22	1,44	0,30	3,82	0,59	1,08	1,86	0,42	5,50	3,96
12	2,06	2,65	0,61	5,13	1,00	1,34	2,74	0,76	5,51	5,29

Distancia desde el aspersor (m)	400 kPa					400 kPa				
	Diámetro (mm)			Velocidad (m/s)		Diámetro (mm)			Velocidad (m/s)	
	ϕ_A	ϕ_V	S_D	V_A	S_V	ϕ_A	ϕ_V	S_D	V_A	S_V
	ϕ_A	ϕ_V	S_D	V_A	S_V	ϕ_A	ϕ_V	S_D	V_A	S_V
3	0,86	1,19	0,30	2,43	0,31	0,81	0,87	0,12	6,90	4,24
6	0,96	1,25	0,30	2,96	0,51	0,86	1,16	0,23	5,90	4,11
9	1,19	1,46	0,34	3,72	0,66	0,97	1,33	0,31	5,52	5,33
12	1,45	1,78	0,40	4,42	0,80	1,30	2,00	0,56	4,73	3,19

ϕ_A diámetro medio aritmético ϕ_V diámetro medio volumétrico S_D desviación estándar del diámetro
 V_A velocidad media S_V desviación estándar de la velocidad

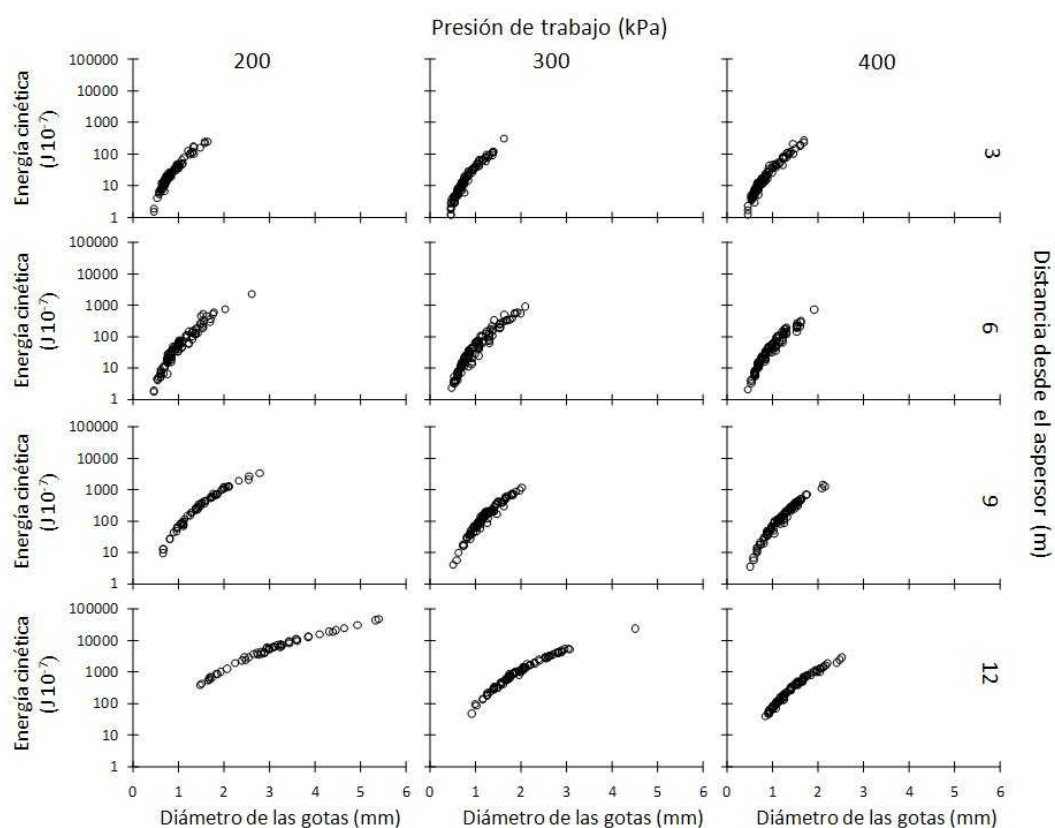


Figura 3. Relación entre el diámetro y la energía cinética según el método fotográfico.

La Tabla 2 presenta el valor medio de la energía cinética de las gotas a distintas distancias al aspersor y para las tres presiones de trabajo consideradas. Los resultados indican que para una misma distancia la energía cinética disminuye conforme se incrementa la presión, lo anterior debido a que en general, conforme se incrementa la presión, el diámetro medio y la velocidad media de movimiento de las gotas que caen a una determinada distancia disminuyen (ver Tabla 1).

Tabla 2. Energía cinética media ($J \cdot 10^{-4}$) de las gotas caracterizadas con la técnica fotográfica y el disdrómetro a distintas distancias del aspersor y presiones de trabajo.

Técnica experimental	Presión (kPa)	Distancia al aspersor			
		3 m	6 m	9 m	12 m
Fotografía	200	0.054	0.159	0.661	6.674
	300	0.040	0.131	0.228	2.564
	400	0.052	0.090	0.225	0.577
Disdrómetro	200	0.179	1.525	1.819	8.263
	300	0.192	0.486	1.019	3.270
	400	0.164	0.284	0.375	0.937

En la Figura 4 se presenta la curva de la energía cinética estimada a partir de los trabajos de Li y Kawano (1995) y la comparación de ésta con respecto a los valores medios observados con las técnicas fotográfica (F) y disdrométrica (D) a distintas distancias desde el aspersor.

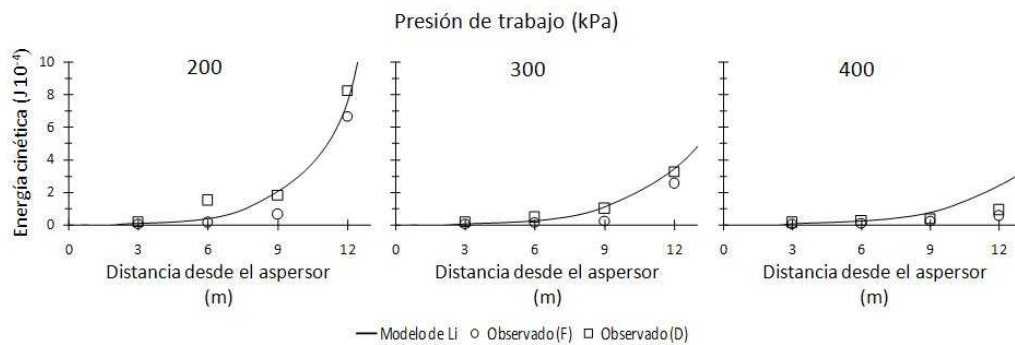


Figura 4. Energía cinética media a distintas distancias y su comparación con la predicción de Li y Kawano

En la Figura 5 se muestra una comparación entre el diámetro volumétrico medio y la energía cinética media para las gotas observadas con fotografías (F) y con el disdrómetro (D) y la que resulta de la simulación de las gotas viajando a través del aire según la teoría balística, considerando el coeficiente de resistencia aerodinámica indicado en la ecuación 4.

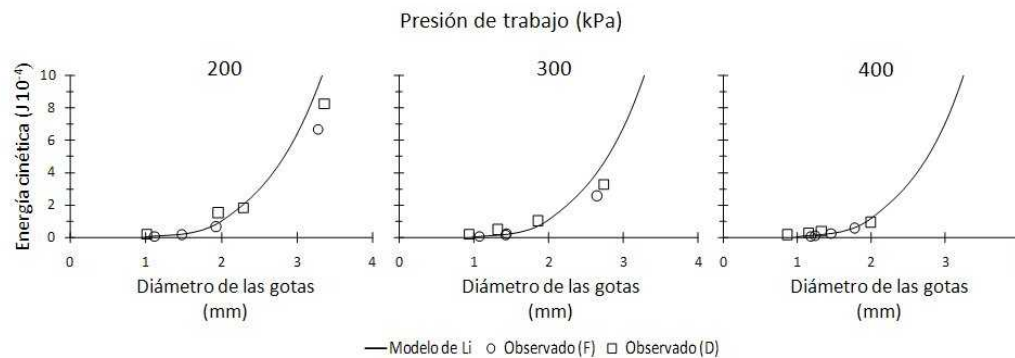


Figura 5. Comparación entre la energía cinética simulada con el modelo de Li y Kawano y la observada con los métodos fotográfico y disdrométrico.

Para calcular la energía cinética por unidad de volumen que impacta sobre el suelo a diferentes distancias del aspersor, se sumó la energía cinética de cada una de las gotas capturadas por la técnica fotográfica, para cada punto de observación (3, 6, 9 y 12 m) y para cada presión de trabajo. En la Figura 6 se presenta la energía cinética para las 12 condiciones analizadas, por cada litro de agua que cae en cada distancia. Además, en la Tabla 3 se presenta la energía cinética media por litro de agua emitida para la superficie que moja el aspersor hasta un radio de 12 m, según los valores reportados en la Tabla 1.

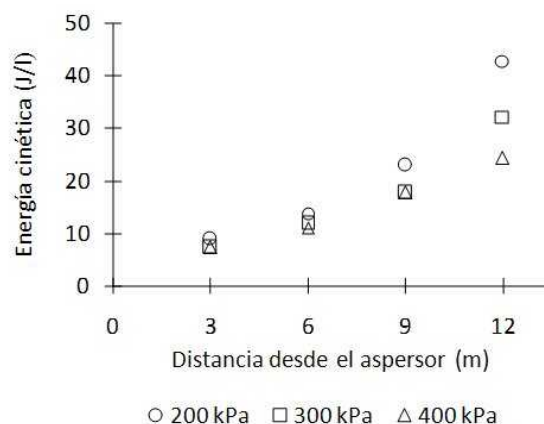


Figura 6. Energía cinética (J/l) estimada de acuerdo a la distribución del tamaño de las gotas a distintas distancias desde el aspersor.

Tabla 3. *Energía cinética media (J/l) para el área mojada por el aspersor (radio de 12 m).*

Presión de trabajo (kPa)	Fotografías	Disdrómetro
200	30,59	38,46
300	21,95	31,48
400	14,55	26,74

Con la información de las gotas capturadas con las fotografías se obtuvieron expresiones para determinar la energía cinética en función del diámetro, resultando que en general se puede calcular como:

$$E_c = \frac{d^n}{K} \quad [9]$$

Los parámetros n y K de la ecuación 9 ajustados a las diferentes presiones analizadas en este trabajo se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. *Valores de n y K para calcular la energía cinética en función del diámetro para distintas presiones de trabajo.*

Presión de trabajo (kPa)	Factores de ajuste	R²
200	$n=4,145$ $K=200000$	0,989
300	$n=4,285$ $K=200000$	0,977
400	$n=4,274$ $K=200000$	0,964
Todas	$n=4,224$ $K=200000$	0,979

4.- CONCLUSIONES

Las gotas de agua emitidas por un aspersor contienen diferentes niveles de energía cinética. Esto es debido a su variabilidad en diámetros (y por lo tanto en sus masas) y en velocidad. La caracterización de las gotas por dos técnicas experimentales ha permitido confirmar que su diámetro y la velocidad se incrementan conforme éstas caen a mayor distancia del aspersor. Así, la energía con la cual impactan las gotas sobre la superficie del suelo es mayor cuanto mayor es la distancia a la que caen. Por otro lado, la teoría balística establece que las gotas de agua que caen a una determinada distancia, son del mismo diámetro, viajan a la misma velocidad y por lo tanto presentan la misma energía cinética. sin embargo, y de acuerdo con la Figura 3, en la realidad se presenta una amplia variabilidad en los diámetros, la velocidad y la energía cinética de las gotas que caen a una determinada distancia resultando con esto que los valores teóricos predicen las condiciones medias de las características geométricas y cinemáticas evaluadas (Figuras 4 y 5).

La energía cinética por litro de agua que cae a determinada distancia, se incrementa conforme disminuye la presión de trabajo; los valores obtenidos en este trabajo corresponden a los reportados por Khol et al. (1985). Para los métodos experimentales analizados, la energía cinética media por cada litro de agua descargada, se incrementa conforme disminuye la presión de trabajo; sin embargo, los valores calculados por la técnica disdrométrica resultan ser mayores comparativamente respecto a los obtenidos con la técnica fotográfica. Lo anterior se debe a que la velocidad media que reporta el disdrómetro no indica una buena relación con respecto al diámetro medio (Tabla 1). Los valores de la energía cinética media para la técnica fotográfica corresponden con los reportados por Kincaid (1996). Con los 1.200 datos experimentales capturados con la técnica fotográfica se

han obtenido ecuaciones para estimar la energía cinética media en función de la gota de agua emitida por el aspersor.

5.- AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado gracias al apoyo de la Agencia Española de Cooperación Internacional (AECI), a través de su programa de becas MAEC capítulo IIB, Curso 2007-2008 y del Plan Nacional de I+D+i a través del proyecto de investigación AGL2007-66716-C03. Se agradece la colaboración de la Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ).

6.- BIBLIOGRAFÍA

- Carrión P., Tarjuelo J. M., Montero J., 2001. SIRIAS: a simulation model for sprinkler irrigation. I Description of model. *Irrigation Science* 20: 73-84.
- DeBoer D. W. y Monnens M. J., 2001. Estimation of drop size and kinetic energy from a rotating spray-plate sprinkler. *Transactions of ASAE* 44(6): 1571-1580.
- Dechmi F., 2002. Water management in sprinkler irrigation systems in the Ebro valley: current situation and scenario simulations. Doctoral Thesis, 217 p.
- Edling, R., 1985. Kinetic energy, evaporation and wind drift of droplets from low pressure irrigation nozzles. *Transactions of ASAE*, 28 (5): 1543-1550.
- Fukui Y., Nakanishi K., Okamura S., 1980. Computer evaluation of sprinkler irrigation uniformity. *Irrigation Science* 2: 23-32.
- Kincaid D. C., Solomon K. H., Oliphant J. C., 1996. Drop size distributions for irrigation sprinklers. *Transactions of ASAE* 39(3):839-845.
- Kincaid D. C., 1996. Spraydrop kinetic energy from irrigation sprinklers. *Transactions of ASAE* 39(3):847-853.
- Kincaid, D.C., Longley, C., 1989. A water droplet evaporation and temperature model. *Transactions of ASAE*, 32: 457-463.
- Khol R. A., DeBoer D. W., Evenson P. D., 1985. Kinetic energy of low pressure spray sprinklers. *American Society of Agricultural Engineers* 28(5):1526-1529.
- Li J., Kawano H., 1995. Simulating water-drop movement from noncircular sprinkler nozzles. *Irrigation and Drainage Engineering* 121:152-158.
- Montero J., Carrión P., Tarjuelo J. M., Nin R., 2006. Calibración de un Disdrómetro óptico para la medida de los tamaños de gota producidas por los aspersores. XXIV Congreso Nacional de Riego, Lugo. p. 148-149.
- Montero J., Tarjuelo J. M., Carrión P., 2001. SIRIAS: a simulation model for sprinkler irrigation. II Calibration and validation of the model. *Irrigation Science* 20: 85-98.
- Montero J., Tarjuelo J. M., Carrión P., 2003. Sprinkler droplet size distribution measured with an optical spectrophluviometer. *Irrigation Science* 22: 47-56.
- Playán E., Zapata N., Faci J. M., Tolosa D., Lacueva J. L., Pelegrín J., Salvador R., Sánchez I., Lafita A., 2006. Assessing sprinkler irrigation uniformity using a ballistic simulation model. *Agricultural Water Management* 84: 86-100.
- Press W. H., Flannery B. P., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., 1988. Numerical recipes in C. *Cambridge University Press*, 735 p.

- Salvador R., Playán E., Bautista C., Burguete J., Zapata N., 2008. Caracterización de gotas emitidas por un aspersor mediante técnicas fotográficas. *XXVI Congreso Nacional de Riegos*. Huesca, España.
- Tarjuelo Martín-Benito J. M., 1995. El riego por aspersión y su tecnología. *Ediciones Mundi-Prensa*, 491 p.
- Voires E. D., Von Bernuth R. D., Mickelson R. H., 1987. Simulating sprinkler performance in wind. *Irrigation and Drainage Engineering* 113(1): 119-130.
- VYRSA, 2007. Sistemas de riego profesional (catalogo). <http://www.vyrsa.com>